Über magnetische Beeinflussung der Polarisation der Resonanz-Fluoreszenz.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

Wilhelm Hanle

aus Mannheim.

Göttingen 1924.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Über magnetische Beeinflussung der Polarisation der Resonanzfluoreszenz[1]).

Von **Wilhelm Hanle** in Göttingen.

Mit sechs Abbildungen. (Eingegangen am 1. November 1924.)

1. Historisches über die magnetische Beeinflussung der Polarisation der Resonanzfluoreszenz und ihre Deutung als Zeemaneffekt. 2. Drehung der Polarisationsebene der Resonanzfluoreszenz von Quecksilber durch schwache magnetische Felder und Bestimmung der Lebensdauer des Anregungszustandes hieraus. 3. Versuche über Anregung der Resonanzfluoreszenz von Quecksilber mit Licht verschiedener Polarisationsart und -richtung.

R. W. Wood und A. Ellet[2]) haben gezeigt, daß bei Anregung der Resonanzfluoreszenz von Quecksilber durch linear polarisiertes Licht der Linie 2536,7 Å.-E. auch die Resonanzfluoreszenz fast vollkommen linear polarisiert ist. Der Polarisationsgrad der Resonanzfluoreszenz wird jedoch durch sehr schwache magnetische Felder (Größenordnung 1 Gauß) wesentlich verändert. Zum Beispiel tritt, wenn senkrecht zur Einstrahlrichtung beobachtet wird und die Kraftlinien des Feldes in der Beobachtungsrichtung liegen, schon bei einer Feldstärke von 2 Gauß völlige Depolarisation ein. Der Verfasser hat diese und ähnliche Resultate von Wood und Ellet zuerst als Zeemaneffekte gedeutet[3]), bei denen eine zu erwartende Aufspaltung vernachlässigbar klein ist gegenüber der Breite der Spektrallinien. Nachweisbar bleiben dann nur die für die Zeemaneffekte typischen Polarisationen. Diese mehr qualitative Deutung als Zeemaneffekt wurde neuerdings in verschiedenen Arbeiten von P. Pringsheim[4]), G. Joos[5]), G. Breit[6]) und E. Gaviola und P. Pringsheim[7]) weiter ausgebaut und, soweit die bisherige Genauigkeit der Versuche reicht, in gute Übereinstimmung mit der quantentheoretischen Deutung des Zeemaneffektes gebracht[8]). Jedoch machte die Deutung des hohen Polarisationsgrades beim Felde Null große Schwierigkeiten. Auf eine Erweiterung und Vertiefung der quantentheoretischen Behandlung des Problems,

[1]) Göttinger Dissertation.

[2]) R. W. Wood und A. Ellet, Proc. Roy. Soc. **103**, 396, 1923.

[3]) W. Hanle, Naturwissensch. **11**, 690, 1923.

[4]) P. Pringsheim, Ebenda **12**, 247, 1924; ZS. f. Phys. **23**, 324, 1924.

[5]) G. Joos, Phys. ZS. **25**, 130, 1924.

[6]) G. Breit, Phil. Mag. **47**, 832, 1924.

[7]) E. Gaviola und P. Pringsheim, ZS. f. Phys. **25**, 367, 1924.

[8]) Siehe ferner A. E. Ruark, P. Foote und F. L. Mohler, Journ. Opt. Soc. Am. **7**, 415, 1923 und F. Weigert, Naturw. **12**, 38, 1924.

die, von Bohr[1]) ausgeführt und vermutlich unterdessen in den „Naturwissenschaften“ erschienen sein wird, wird weiter unten eingegangen.

Die vorliegende Arbeit gibt einige weitere experimentelle Beiträge zur Frage der Polarisation der Resonanzfluoreszenz des Quecksilbers und ihre Beeinflussung durch Magnetfelder[2]). Als erster Punkt soll eine Drehung der Polarisationsebene der Resonanzfluoreszenz beschrieben werden, deren Auftreten man nach der im folgenden skizzierten klassischen Theorie des Zeemaneffektes zu erwarten hat.

Nach dieser besteht die Bewegung eines quasielastisch gebundenen Elektrons im Magnetfeld in einer Präzessionsbewegung um die Feldrichtung. Schwingt speziell das Elektron senkrecht zum Magnetfeld, so beschreibt es eine Rosette in einer zur Feldachse senkrechten Ebene.

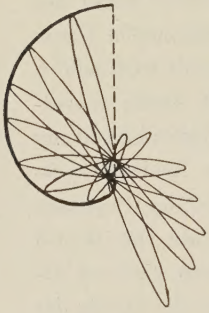

Fig. 1.

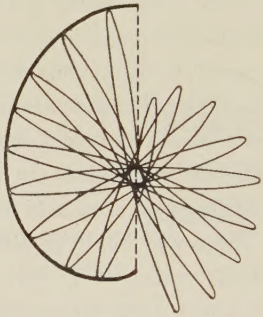

Fig. 2.

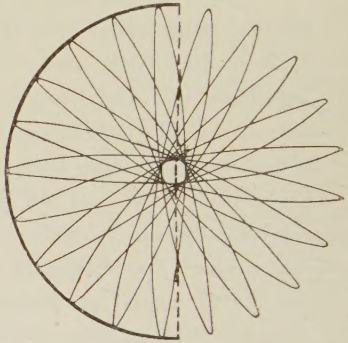

Fig. 3.

Infolge der Strahlungsdämpfung des Elektrons wird die Rosette mit der Zeit abklingen. Die sich für verschieden starke Felder ergebenden Verhältnisse sind in den Fig. 1 bis 3 dargestellt. Bei ganz schwachen Feldern ist die Umlaufszeit groß gegenüber der Halbwertszeit der Abklingung; z. B. kann die Amplitude der Schwingung nach einem Umlauf von 180^0 praktisch abgeklungen sein (Fig. 1). Bei wachsender Feldstärke wird die Rosettenbewegung immer vollständiger (Fig. 2). Wird endlich die Umlaufszeit klein gegenüber der Halbwertszeit der Abklingung, so wird ein Umlauf der Rosette beschrieben, wie bei einem ungedämpft schwingenden Elektron (Fig. 3). Wenn also das Fluoreszenzlicht in der Vertikalebene polarisiert ist, ist zu erwarten, daß es bei ganz schwachen

[1]) Der Inhalt der Arbeit wurde uns durch die Freundlichkeit von Herrn N. Bohr schon vorher zugänglich gemacht.

[2]) Der Hauptteil wurde in einer Sitzung des Gauvereins Niedersachsen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Hamburg am 22. Juni 1924 vorgetragen.

Feldern schwach depolarisiert und der polarisierte Anteil aus der Vertikalebene herausgedreht ist (Fig. 1), daß bei wachsender Feldstärke die Depolarisation und die Drehung der Schwingungsebene des polarisierten Anteils größer wird (Fig. 2) und bei noch höherer Feldstärke das Fluoreszenzlicht völlig depolarisiert ist (Fig. 3). Die mit wachsendem Magnetfeld schnell steigende Depolarisation wurde, wie oben erwähnt, von Wood und Ellet nachgewiesen. Es schien nun wichtig, zu untersuchen, ob auch eine Drehung der Polarisationsebene bei kleinen Feldstärken eintritt. Dies geschah mit folgender Versuchsanordnung:

Als Lichtquelle diente eine Quarzquecksilberlampe Q von Heraeus, welche mit 220 Volt und 2,5 Amp. betrieben wurde. Durch einen Elektromagnet, welcher den Lichtbogen an die Wandung drückte, und durch

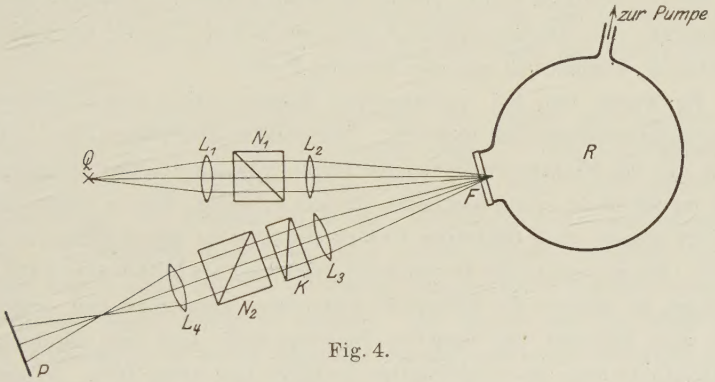

Fig. 4.

Anblasen mit Druckluft wurde eine Selbstumkehr der Resonanzlinie 2536,7 möglichst vermieden. Das Licht dieser Lampe wurde durch die Quarzlinse L_1 parallel gemacht, durch den ultraviolett durchlässigen Nicol N_1 polarisiert und durch die Linse L_2 auf das Resonanzgefäß R konzentriert. L_2 war aus Flußspat, da Linsen aus Quarzkristall wegen der Doppelbrechung und Drehung der Polarisationsebene im Quarz nicht zu gebrauchen waren. Das Resonanzgefäß bestand einfach aus einer Glaskugel mit einem Fenster aus dünnem, geschmolzenem Quarz und einem Ansatz, welcher über ein Dewargefäß zur Pumpe führte. Meist wurde bei einem Quecksilberdampfdruck gearbeitet, wie er bei Zimmertemperatur herrscht, also bei etwa 10^{-3} mm, manchmal auch bei einem Dampfdruck von $2 \cdot 10^{-4}$ mm, der der Temperatur von 0^0 entspricht. Das Resonanzgefäß befand sich im Mittelpunkt einer großen Spule in kardanischer Aufhängung, welche zur Kompensation des Erdfeldes diente, um den störenden Einfluß desselben auf die Polarisation der Resonanz-

fluoreszenz zu vermeiden. Die Kompensation wurde ballistisch nachgewiesen vermittelst des in einer Spule induzierten Stromes, die in zwei zueinander senkrechten Richtungnn drehbar war. Kompensiert wurde auf etwa $^1/_{100}$ Gauß genau. Die Untersuchung der Fluoreszenzstrahlung geschah durch einen Drehquarzkeil. Derselbe besteht bekanntlich aus einer Kombination von einem linksdrehenden und einem rechtsdrehenden Quarzkeil, welche senkrecht zur optischen Achse geschnitten sind und mit einem Nicol zusammen im polarisierten Licht Streifen zeigen, aus deren Intensität man auf die Stärke der Polarisation und aus deren Verschiebung man auf Drehungen der Polarisationsebene schließen kann. Als Marke diente ein auf der Kristallfläche angebrachtes Fadenkreuz. Beobachtet wurde in einem Winkel von etwa 20° zur Einstrahlrichtung [1]). Das Fluoreszenzlicht wurde durch eine Flußspatlinse L_3 parallel gemacht, durchsetzte den Drehquarzkeil K und den Nicol N_2; die Quarzlinse L_4 bildete das Fadenkreuz auf die Kamera P ab.

Es wurde nun bei vollständiger Kompensation des Erdfeldes mit linear polarisiertem Licht angeregt. Der elektrische Vektor stand vertikal. Dann war das Fluoreszenzlicht auch linear polarisiert. Der Polarisationsgrad wurde nicht genau bestimmt, da wir erfuhren, daß in einem anderen Institut gerade auch derartige Untersuchungen an Quecksilber im Gange sind [2]). Wurde nun in der Beobachtungsrichtung ein Hilfsfeld von 0,5 Gauß angelegt, so wurden die Polarisationsstreifen verwaschen und verschoben sich; dies bedeutet eine gewisse Depolarisation und eine Drehung der Polarisationsebene des polarisierten Anteiles (um etwa 20°). Wurde das Magnetfeld auf 1 Gauß erhöht, so wurden die Depolarisation und die Drehung noch größer. Bei 2 Gauß waren die Streifen kaum mehr zu erkennen, das Fluoreszenzlicht also nahezu vollständig depolarisiert. Wurde das Feld umgepolt, so fand bei den entsprechenden Feldstärken eine Drehung nach der anderen Seite statt. Auch war der Dreheffekt unabhängig von der Stellung des elektrischen Vektors des erregenden Lichtes. Der Drehungssinn entsprach dem Umlaufssinn der Präzessionsbewegung.

---

[1]) R. W. Wood und A. Ellet haben in einem Winkel von 90° beobachtet. Da aber bei diesem Versuch die Intensität und Polarisation des Fluoreszenzlichtes ohne Magnetfeld symmetrisch um die Vertikale verteilt ist, ist der Winkel zwischen Einstrahl- und Beobachtungsrichtung unwesentlich, wenn nur das nachher benutzte Magnetfeld in der Beobachtungsrichtung liegt.

[2]) In einer soeben erschienenen neuen Arbeit von Wood und Ellet (Phys. Rev. **24**, 243, 1924) wird wiederum der Polarisationsgrad der Quecksilberfluoreszenz ohne Magnetfeld zu 90 Proz. angegeben.

Die Messungen des Polarisationsgrades und der Drehung der Polarisationsebene bieten beide eine Möglichkeit, die Halbwertszeit der Abklingung (nach der Auffassung der Quantentheorie also die mittlere Verweilzeit; s. weiter unten) zu berechnen. Die erste Methode, welche infolge der Schwierigkeit, den Polarisationsgrad im ultravioletten Spektralgebiet genau zu messen, sehr fehlerhaft werden kann, benutzen auch Breit[1]) und Eldrige[2]). Die zweite Methode scheint auch für genauere Bestimmungen der Halbwertszeit der Abklingung geeignet zu sein. Die eigenen Messungen waren bisher mehr qualitativer Natur. Eine vorläufige Schätzung, aus der bei bekannter Feldstärke eintretenden Drehung, wo wegen der $^3/_2$normalen Aufspaltung auch das $^3/_2$fache der klassischen Präzessionsgeschwindigkeit eingesetzt wurde, ergibt 10^{-7} sec (Lebensdauer des $2p_2$-Zustandes des Quecksilbers), was mit den von Breit und Eldrige aus der Depolarisation berechneten Werten und auch mit direkten Messungen von W. Wien, die an Hg-Kanalstrahlen gewonnen sind, gut übereinstimmt.

Auch eine weitere Konsequenz der am Anfang entwickelten Auffassung läßt sich durch den Dreheffekt prüfen. Eine Verstärkung der Dämpfung der Resonatoren durch zugesetzte Gase muß nämlich eine Verminderung der Drehung und eine Verstärkung der Polarisation ergeben. Naturgemäß kann man einen solchen Effekt besonders stark bei solchen Gasen erwarten, die bei einem Zusammenstoß auf den Strahlungsprozeß sehr stark dämpfend wirken. Bei Gasen, die die Schwingung eines Oszillators sehr wenig dämpfen, ihn aber aus seiner Richtung drehen, würde dagegen nur eine Verstärkung der Depolarisation zu erwarten sein. Letztere Eigenschaft haben vor allem die Edelgase [s. Wood[3]), sowie die demnächst erscheinende Dissertation von K. Donat], während Wasserstoff, wie eben dort sich ergeben hat, sehr stark die Fluoreszenz auslöscht. Die Resultate der Versuche entsprachen der Erwartung. Bei Zusatz von Argon wurden die Streifen sehr verwaschen, wenn der Druck des zugesetzten Gases 2 mm betrug, was Depolarisation bedeutet. Bei Zusatz von Wasserstoff dagegen verschoben sich die Streifen im Sinne einer teilweisen Aufhebung der Drehung und wurden gleichzeitig schärfer, was eine Vergrößerung der Polarisation bedeutet. Wegen der größeren Lichtschwäche des Fluoreszenzlichtes bei Wasserstoffzusatz mußte, damit man sich über die Schärfe der Streifen nicht täuschte, entsprechend länger

[1]) G. Breit, Phil. Mag. **47**, 832, 1924.
[2]) J. A. Eldrige, Phys. Rev. **23**, 772, 1924.
[3]) R. W. Wood, Phil. Mag. **44**, 1107, 1922.

exponiert werden, so daß die Schwärzung mit und ohne Gaszusatz gleich wurde. Bei Argonzusatz, wo eine äußerst schwache Auslöschung, dagegen eine starke Druckverbreiterung der Absorption die Fluoreszenz der Resonanzlinie anwachsen läßt, wurde entsprechend kürzer belichtet.

Das Experiment hat also die Voraussagen der Theorie bestätigt. Nun haben wir aber in unseren Überlegungen so getan, als ob ein einmal angestoßenes Elektron gedämpft ausschwingt. In Wirklichkeit vollführt es erzwungene Schwingungen im Strahlungsfeld. Da das Elektron jedoch wegen seiner Dämpfung nicht nur auf seine Eigenfrequenz, sondern auch auf benachbarte Frequenzen entsprechend schwächer anspricht, ergibt dieser Fall praktisch ganz das gleiche Verhalten, wie es oben an dem frei ausschwingenden Elektron skizziert wurde.

Nachdem sich somit gezeigt hat, daß die Folgerungen der klassischen Theorie vollkommen erfüllt sind, fragt es sich, wie diese Erscheinungen in der Quantentheorie wiedergegeben werden. Die Quantentheorie setzt an Stelle eines schwingenden Elektrons den Übergang von angeregten Zuständen in nicht angeregte Zustände. An die Stelle der Dämpfung tritt die mittlere Lebensdauer der Anregungszustände und an die Stelle der Stoßdämpfung die Wirkung der Stöße zweiter Art. Die Quantentheorie vermag sogar für die verschiedenen Wirkungen des Gaszusatzes von Argon bzw. Wasserstoff anschaulichere Bilder zu setzen als die klassische Theorie. Statt daß wir bei bekannter Feldstärke aus dem Depolarisationsgrad oder dem Betrag der Drehung der Polarisationsebene einen Schluß auf die Dämpfung machen, ergibt sich aus der Quantentheorie die mittlere Lebensdauer des Anregungszustandes. So weit bietet es keine Schwierigkeiten, die klassische Deutung durch eine quantentheoretische zu ersetzen. Dagegen werden wir durch das Experiment gezwungen, in einem anderen Punkte ergänzende Annahmen zur Quantentheorie zu machen, da sonst Schwierigkeiten entstehen.

Es besteht nämlich noch ein anderer sehr wesentlicher Unterschied zwischen klassischer Theorie und Quantentheorie. Die Aufspaltung in mehrere Spektrallinien beim Zeemaneffekt wird nicht mehr als durch die komplizierte Bewegung eines einzigen Oszillators entstanden angesehen, die man nach mathematischen Methoden in verschiedene Frequenzen zerlegen kann, sondern die verschiedenen Frequenzen werden von verschiedenen Atomen ausgesandt, die sich durch ihren Energiegehalt ($h\nu$-Beziehung) und ihre Einstellung in bezug auf die Feldachse (Richtungsquantelung) unterscheiden. Für größere Magnetfelder und dadurch bewirkte größere Aufspaltung sind diese beiden von der Quantentheorie geforderten Be-

hauptungen erwiesen. Erstere dadurch, daß man, was allerdings nur für natürliche Aufspaltung (Dubletts) gezeigt wurde, nur eine Linie erhält, wenn man den Atomen die zur Emission dieser Linie nötige Energie zuführt (sowohl durch Elektronenstoß als auch durch Lichtanregung). Die zweite Behauptung ist durch die Ablenkung von Atomstrahlen durch Stern und Gerlach eindeutig bewiesen. In unserem Falle sollten beim longitudinalen Zeemaneffekt der Quecksilberlinie 2536,7 zwei zirkular polarisierte Komponenten (σ-Komponenten) von etwas verschiedener Frequenz von zwei verschiedenen Atomen ausgesandt werden. Um die Drehung der Polarisationsebene zu erhalten, müßte man dann ein Zusammenwirken der zirkular polarisierten Emissionen zweier Atome annehmen, die in einem mittleren Abstand voneinander sich befinden, der groß ist gegenüber einer Wellenlänge. Hieran ist schlechterdings nicht zu denken. Es bleibt daher nur die Annahme, daß bei den kleinen Feldstärken weder die Richtungsquantelung noch die energetische Aufspaltung der angeregten Atome in zwei Terme vollkommen bestehen geblieben ist. Wir kommen vielmehr zu dem Schluß, daß man gezwungen ist, einen speziellen Übergang von richtungsgequantelten und damit energetisch verschiedenen Atomen für starke Magnetfelder zu nicht richtungsgequantelten Atomen beim Feld Null anzunehmen. Dieses Resultat steht somit im Widerspruch zu der gewöhnlichen Annahme, daß auch beim Feld Null die Richtungsquantelung vollkommen bestehen bleibt und nur die Aufspaltung Null wird.

Über die Art dieses von uns beobachteten allmählichen Verschwindens der Richtungsquantelung und die überdies nahezu 100 Proz. betragende Polarisation bei Ausschluß äußerer Felder hat Bohr nun neuerdings in einer Zuschrift an die „Naturwisenschaften“ spezielle Vorstellungen entwickelt. Sie laufen, soweit das hier besprochene Phänomen in Frage kommt, darauf hinaus, daß Richtungsquantelung, d. h. Quantelung einer durch das Magnetfeld neu hinzukommenden Periode, erst einen Sinn hat, wenn diese Periode klein ist gegen die mittlere Lebensdauer des Anregungszustandes. In dem Gebiet, in dem die Periode gleich oder kleiner als die mittlere Lebensdauer wird, muß eine Entartung eintreten, und wenn die Feldstärke Null geworden ist, d. h. die Periode unendlich lang ist, haben wir ein vollkommen entartetes System vor uns. Im Übergangsgebiet wird die Richtungsquantelung unscharf, d. h. die Richtung der Atomachsen statistisch in gewissen Winkeln um die bei vollkommener Richtungsquantelung ausgezeichnete Richtung verteilt. Dieser Übergang vom nicht entarteten zum entarteten System ist es, der hier beobachtet wird.

Bei Gelegenheit des oben erwähnten Vortrages des Verfassers hatte Herr H. A. Kramers aus Kopenhagen, den wir auch in einigen anderen Punkten für seinen Rat herzlich zu danken haben, uns auf die Notwendigkeit hingewiesen, sicherzustellen, daß der beobachtete Dreheffekt nicht etwa ein Faradayeffekt des Quecksilberdampfes im Gebiet seiner Eigenschwingung sei. Dies war um so notwendiger, als Gerlach und Schütz[1]) bei Natriumdampf einen solchen Faradayeffekt mit großer Deutlichkeit in der Umgebung der *D*-Linien in Absorption erhalten haben. Es wurde daher viel Mühe darauf verwandt, festzustellen, ob tatsächlich auch hier ein Faradayeffekt vorliegt. Um das Resultat vorwegzunehmen, hat sich erwiesen, daß dies nicht der Fall ist. Wegen der Wichtigkeit dieser Entscheidung sollen die diese Resultate ergebenden Experimente hier besprochen werden.

Der Faradayeffekt besteht bekanntermaßen in der Drehung der Polarisationsebene durch ein Magnetfeld beim Durchgang des Lichtes durch einen dispergierenden Körper. Daher verläuft rechts und links von der Absorptionslinie die Drehung im gleichen Sinne wie die Larmorpräzession beim Zeemaneffekt, im Kern der Linie erfolgt die Drehung im umgekehrten Sinne. Schon dieses Kriterium machte es unwahrscheinlich, daß ein Faradayeffekt vorliegt, da bei der Resonanzfluoreszenz hauptsächlich der Kern der Linie wirkt und die beobachtete Drehung im Sinne der Präzessionsbewegung erfolgte. Typisch für den Faradayeffekt ist ferner, daß die Drehung des Lichtes zunimmt proportional mit der Länge des im Felde durchlaufenen Weges. Im Gegensatz hierzu tritt unser Dreheffekt in voller Stärke auf, sobald das Resonanzgefäß sich im longitudinalen Magnetfeld befindet, ganz unabhängig davon, wie lang der Weg war, den das erregende Licht im Magnetfeld zurückgelegt hat, und unabhängig auch davon, wie weit der Weg ist, den das Fluoreszenzlicht im Magnetfeld zurückgelegt hat, ehe es zur Beobachtung gelangte. Diese beiden Resultate ergeben sich aus folgenden Versuchen.

Zwischen Lichtquelle und das in der oben beschriebenen Weise angebrachte Resonanzgefäß wurde ein Absorptionsgefäß aus Quarz gebracht, das bis auf den Dampfdruck des Quecksilbers ausgepumpt wurde; derselbe wurde zwischen 10^{-3} und $2 \cdot 10^{-4}$ mm variiert. Das Absorptionsgefäß wurde in ein longitudinales Magnetfeld gebracht, dessen Feldstärke zwischen einigen Zehntel bis 100 Gauß variiert wurde. Die Länge des Absorptionsrohres betrug 2 cm. Dann trat der Dreheffekt bei der im

[1]) W. Gerlach u. W. Schütz, Naturwissensch. **11**, 637, 1923.

Resonanzgefäß angeregten Fluoreszenz nur auf, wenn das Resonanzgefäß selbst im Magnetfeld war. Ob das Absorptionsgefäß im Magnetfeld war oder nicht, war für seine Größe vollkommen gleichgültig. Auch eine Vertauschung der Reihenfolge von Resonanz- und Absorptionsgefäß im Strahlengang ergab dieselbe Unabhängigkeit des Dreheffekts von dem Magnetfeld, in welchem sich das Absorptionsgefäß befand.

Es gelang auch nicht, den Faradayeffekt der Linie 2536,7 Å derart nachzuweisen, wie es Gerlach und Schütz[1]) für die *D*-Linien ausgeführt haben, obgleich eine Wiederholung der Gerlach-Schützschen Versuche für die *D*-Linien ihr Resultat vollkommen bestätigte. Offenbar ist wegen des etwa 50mal geringeren Absorptionskoeffizienten für die Strahlung 2536.7 der Faradayeffekt viel kleiner als der für die *D*-Linien im Natrium.

Der Beweis, daß es für den Dreheffekt gleichgültig war, welchen Weg das Fluoreszenzlicht im Magnetfeld zurücklegte, wurde folgendermaßen geführt. Als Resonanzlampe diente ein Rohr aus geschmolzenem

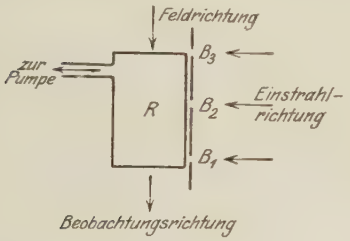

Fig. 5.

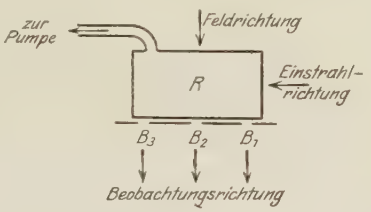

Fig. 6.

Quarz mit planen Endflächen von 3 cm Länge. Feldrichtung, Einstrahlrichtung und Beobachtungsrichtung mögen aus Fig. 5 hervorgehen. Ein Vorteil dieser Anordnung ist, daß man die Möglichkeit hat, mit unpolarisiertem Licht anzuregen, wodurch man sehr an Intensität gewinnt. [Expositionsdauer einige Sekunden statt einer Viertelstunde[2]]. Der beobachtete Dreheffekt war unabhängig davon, ob bei B_1, B_2 oder B_3 durch Blenden bestrahlt wurde. Fig. 6 zeigt die Vertauschung von Einstrahlrichtung und Beobachtungsrichtung. Die Versuche mit dieser Anordnung

[1]) W. Gerlach u. W. Schütz, Naturwissensch. **11**, 637, 1923.

[2]) Die mit Kanadabalsam gekitteten Nicols absorbieren das ultraviolette Spektralgebiet vollständig. Man muß daher Nicols mit einer Luftschicht (Foucaultsche oder Glansche Prismen) benutzen, welche indessen immer noch stark absorbieren und einen gut parallelen Strahlengang erfordern, da sonst die Polarisation keine vollständige wird, und wegen ihrer Dimensionen das Öffnungsverhältnis der Linsen nicht voll auszunutzen gestatten.

ergaben das obige Resultat. Somit ist die beobachtete Drehung in der oben ausgeführten Weise zu verstehen.

Die vorliegende Arbeit muß wegen des merkwürdigen Resultats naturgemäß ergänzt werden durch weitere Untersuchungen der Fluoreszenz an anderen einatomigen Metalldämpfen. Es ist speziell geplant, Natrium weiter zu untersuchen, da es wegen seines anomalen Zeemaneffekts (Aufspaltung des Normalzustandes im Magnetfeld) besonders interessante Resultate verspricht [1]).

Ein weiterer Punkt, der hier untersucht wurde, bezieht sich auf einen Versuch von Wood und Ellet, der bei ihnen quantitative Abweichungen gegen die entwickelten theoretischen Anschauungen ergeben hatte. Wood und Ellet haben die Resonanzfluoreszenz mit linear polarisiertem Licht angeregt und senkrecht zur Schwingungsebene beobachtet. In einem vertikal oder horizontal stehenden Felde war die Resonanzfluoreszenz linear polarisiert. Stand das Magnetfeld schief zur Vertikalen, so war die Polarisation unvollständig und verschwand, wenn der Winkel zwischen der Vertikalen und der Feldrichtung 45° betrug, während sich nach unseren theoretischen Überlegungen 54° ergibt, wie leicht einzusehen ist. Wenn auch diese Unstimmigkeit durch Ungenauigkeit der Versuche bedingt sein konnte, schien es doch wünschenswert, diesen Punkt durch genauere Messung aufzuklären. Es wurde daher eine Anordnung gewählt, welche eine sichere Bestimmung dieses Winkels zuließ. Das Magnetfeld lag bei allen Versuchen in der Vertikalen, während der elektrische Vektor E des Primärstrahls gedreht wurde. Stand E vertikal, so war die in einem Winkel von 20° zur Einfallsrichtung beobachtete Fluoreszenzstrahlung ebenfalls in der Vertikalebene linear polarisiert. Wurde E allmählich bis zu einer Winkelstellung von 50° zur Vertikalen gedreht, so blieb die Polarisationsebene des Fluoreszenzlichtes erhalten, während der Polarisationsgrad immer kleiner wurde. Stand E andererseits horizontal, so war die Fluoreszenzstrahlung in der Horizontalebene polarisiert und blieb in dieser Ebene polarisiert unter Änderung des Polarisationsgrades, wenn E bis zu einem Winkel von 60° zur Vertikalen aus der Horizontalstellung herausgedreht wurde. Da das Minimum der Polarisation immer zwischen 50 und 60° lag und der Sprung der Polarisationsebene des polarisierten Anteils aus der Vertikalebene in die Horizontalebene stets

[1]) Anmerkung bei der Korrektur. Unterdessen hat Heisenberg die Bohrschen Anschauungen auf die komplizierteren Zeemanaufspaltungen bei Na ausgedehnt und uns freundlicherweise seine Resultate schon vor der Publikation zugänglich gemacht; es sei deshalb hier auf diese Arbeit hingewiesen.

in der Nähe von 45° erfolgte, darf man die Folgerung unserer Auffassung bestätigt und die Diskrepanz mit dem Experiment als beseitigt ansehen.

Schließlich wurden Versuche mit Anregung durch elliptisch polarisiertes Licht gemacht. Zu diesem Zweck wurde in den Primärstrahlengang zwischen Nicol und Flußspatlinse ein Soleil-Babinet gebracht, welcher zur Erzeugung elliptisch polarisierten Lichtes diente. Die beiden Quarzkeile des Soleil waren gegeneinander verschiebbar, wodurch die Elliptizität des Lichtes im Primärstrahlengang geändert werden konnte [1]). Zur Analyse der Elliptizität des Fluoreszenzlichtes wurde der Drehquarzkeil im Sekundärstrahlengang durch ein Babinet ersetzt. Beobachtet wurde wiederum in einem Winkel von 20° zur Einstrahlrichtung. Eine weitere Verkleinerung dieses Winkels war wegen technischer Schwierigkeiten nicht möglich. Zuerst wurde ohne Magnetfeld (und natürlich bei Kompensation des Erdfeldes) mit beliebigem elliptischen Licht angeregt; dann war das Fluoreszenzlicht auch elliptisch polarisiert, und zwar von derselben Elliptizität wie das einfallende Licht. Änderte man die Elliptizität

[1]) Es mag hier eine Schwierigkeit beim Arbeiten mit Soleil und Babinet im ultravioletten Spektralgebiet besprochen werden. Bekanntlich bestehen beide aus Quarzkeilen, die parallel zur Achse geschnitten sind. Ein genau senkrecht zur Kristallfläche und damit auch senkrecht zur optischen Achse der Kristalle laufender Lichtstrahl erleidet dann nur eine Doppelbrechung. Ein etwas schief einfallender Strahl hingegen wird infolge der Rotationsdispersion des Quarzes auch eine Drehung der Polarisationsebene erfahren. Dieselbe ist klein für sichtbares Licht, jedoch sehr groß für ultraviolettes Licht (145° pro Millimeter Schichtdicke für parallel der Achse laufende Lichtstrahlen der Linie 2536,7). Für Strahlen, die einen Winkel α mit der Normalen der Kristallfläche bilden, wird die Drehung also $145^0 \sin\alpha$ pro Millimeter Schichtdicke. Die Strahlen sind nun nur dann vollständig parallel, wenn (siehe die Anordnung auf S. 95) erstens die Lichtquelle genau im Brennpunkt der ersten Linse steht und zweitens die Ausdehnung der Lichtquelle klein ist bzw. die Brennweite der ersten Linse sehr groß ist. Das erstere ist durch genaue Justierung zu erreichen, dem letzteren sind gewisse Grenzen gesetzt, da die Gesamthelligkeit mit dem Quadrat des Durchmessers der Lichtquelle oder, was auf dasselbe hinauskommt, mit dem Quadrat der Brennweite der ersten Linse abnimmt. Bei unseren Versuchen betrug der Durchmesser der Blende an der Lichtquelle 2 mm, die Brennweite der ersten Linse 8 mm. Die Schichtdicke des uns zur Verfügung stehenden Soleils war 5 mm. Die von dem Rande der Blende ausgehenden Lichtstrahlen erfuhren dann eine Drehung ihrer Polarisationsebene um etwa 10°. Dieselben Schwierigkeiten sind bei der Analyse des elliptischen Lichtes durch einen Babinet zu überwinden. Wir benutzten als Babinet einen einzigen sehr dünnen Keil (etwa 0,5 mm dick in der Mitte), infolgedessen war die Drehung der schief einfallenden Strahlen nicht so sehr groß, wie beim Soleil im Primärstrahlengang. Beim Arbeiten mit dem Drehquarzkeil ist weniger Vorsicht nötig, da zwar schief einfallende Strahlen hier außer der Drehung der Polarisationsebene noch eine Doppelbrechung erfahren, dieselbe jedoch viel geringer ist als die Drehung beim Soleil und Babinet.

desselben durch Verschieben der Keile des Soleil gegeneinander, so änderte sich die Elliptizität des Fluoreszenzlichtes in derselben Weise. War das eine zirkular polarisiert, so war es auch das andere. Ein Magnetfeld von einigen Gauß in der Beobachtungsrichtung beeinflußte die Fluoreszenz folgendermaßen: Bei Anregung mit zirkular polarisiertem Licht war das emittierte Licht wiederum zirkular polarisiert. Bei Anregung mit linear polarisiertem Licht war es völlig depolarisiert. Bei Anregung mit elliptischem Licht beliebiger Phasendifferenz war es teils zirkular polarisiert, teils depolarisiert. Im ersten Falle wird nur eine der zirkularen Komponenten der Zeemanaufspaltung angeregt und infolgedessen wiederum zirkulares Licht emittiert. Im zweiten Falle werden nach unseren früheren Überlegungen zwei links und rechts polarisierte Schwingungskomponenten erregt, welche zusammen depolarisiertes Licht emittieren. Im dritten Falle kann man sich das elliptische Licht zusammengesetzt denken aus einem zirkularen Anteil, der bei dem Fluoreszenzakt zirkular polarisiert bleibt, und einem linearen Anteil, welcher hierbei depolarisiert wird. Die Beobachtungen ohne Magnetfeld sind klassisch durch das Mitschwingen elliptischer Resonatoren zu verstehen. Ihre quantentheoretische Deutung unter Zuhilfenahme der neuen Anschauung von Bohr ist in der Entartung der Systeme bei fehlendem oder sehr schwachem Magnetfeld zu suchen, welche Phasenbeziehungen zwischen π nnd σ Komponenten zur Folge hat und daher bewirkt, daß elliptisches Licht bei der Reemission sich immer wieder zu Licht derselben Elliptizität zusammensetzt.

Die Bedeutung der Versuche über Anregung mit zirkularem Licht im Magnetfeld liegt darin, daß, während vorher mit beiden σ-Komponenten (d. h. in unserem Falle mit linear polarisiertem Licht, das man sich in zwei zirkular polarisierte Komponenten zerlegt denken kann) angeregt worden war, hier nur mit einer Komponente angeregt und, wie zu erwarten war, wiederum nur die eine Komponente in Reemission beobachtet wurde. Dies gilt natürlich nur so lange, als keine wesentlichen Störungen durch Stöße vorliegen.

Die hier ausgeführten Versuche waren im wesentlichen im Juli dieses Jahres abgeschlossen; der Versuch ihrer theoretischen Deutung verzögerte die Publikation bis jetzt. Unterdessen sind außer der oben genannten theoretischen Arbeit von Bohr weitere Arbeiten über dasselbe Thema erschienen, eine größere experimentelle Publikation von Wood und Ellet[1]), in welcher die von ihnen vor einem Jahr veröffentlichten Versuche näher

[1]) R. W. Wood u. A. Ellet, Phys. Rev. **24**, 243, 1924.

ausgeführt werden, und eine theoretische Publikation von Eldrige[1]), in welcher dieser anscheinend ohne Kenntnis der meisten eingangs erwähnten Publikationen die Experimente von Wood und Ellet nochmals vom Standpunkt der klassischen Theorie aus diskutiert, unter anderem aus ihr auch den Dreheffekt voraussagt und in einer Fußnote mitteilt, daß Wood im Juli dieses Jahres diesen Dreheffekt auch beobachtet hat. Nähere Ausführungen werden von Eldrige nicht gemacht; er weist nur am Ende seiner Arbeit kurz darauf hin, daß die quantentheoretische Deutung des Dreheffektes Schwierigkeiten verursacht.

Zusammenfassung.

Es wird gezeigt, daß die mit linear polarisiertem Licht angeregte Resonanzfluoreszenz des Quecksilbers durch ein Magnetfeld nicht nur depolarisiert wird, sondern daß auch die Polarisationsebene durch ein Magnetfeld gedreht wird. Dieser Effekt ist kein Faradayeffekt. Seine quantentheoretische Deutung wird diskutiert.

Die Versuche von Wood und Ellet werden in einer Hinsicht, wo eine Abweichung gegen die Theorie vorzuliegen schien, ergänzt.

Es werden Untersuchungen über Anregung der Resonanzfluoreszenz mit elliptisch polarisiertem Licht beschrieben.

Vorliegende Arbeit wurde auf Anregung und unter dauernder Mitwirkung von Herrn Prof. Franck, dem ich auch an dieser Stelle meinen wärmsten Dank aussprechen möchte, im Zweiten Physikalischen Institut der Universität Göttingen ausgeführt. Zu besonderem Dank sind wir auch dem Elektrophysik-Ausschuß verpflichtet, welcher die Mittel zur Beschaffung einiger notwendiger Apparate bewilligt hat.

Göttingen, den 29. Oktober 1924.

---

[1]) Eldrige, Phys. Rev. **24**, 234, 1924.

Lebenslauf.

Ich, Wilhelm Hanle, wurde am 13. Januar 1901 zu Mannheim als Sohn des Kaufmanns Adolf Hanle geboren. Ich besuchte das Realgymnasium zu Mannheim, das ich im Sommer 1919 mit dem Zeugnis der Reife verließ. Ich studierte fünf Semester in Heidelberg und fünf Semester in Göttingen, wobei ich die Vorlesungen, Seminarien und Praktika folgender Dozenten besuchte:

Curtius, Driesch, Lenard, Liebmann, Jaspers, Perron, Pfeiffer, Staeckel, Wolf in Heidelberg und

Born, Franck, Hilbert, Runge, Tammann in Göttingen.

Allen meinen verehrten Lehrern bin ich zu großem Danke verpflichtet.